

N O T I C E

THIS DOCUMENT HAS BEEN REPRODUCED FROM
MICROFICHE. ALTHOUGH IT IS RECOGNIZED THAT
CERTAIN PORTIONS ARE ILLEGIBLE, IT IS BEING RELEASED
IN THE INTEREST OF MAKING AVAILABLE AS MUCH
INFORMATION AS POSSIBLE

1972 on the NASA sponsorship
of the TELLUS Project
by the French Government
and the Italian Government

81-10040
CR-163547

TELLUS NEWSLETTER 13

February 1980

ETUDE DES TEMPERATURES RADIOMETRIQUES - FLUCTUATIONS, REPARTITIONS,
SIGNIFICATIONS

A STUDY OF RADIOMETRIC SURFACE TEMPERATURES - THEIR FLUCTUATIONS, DISTRIBUTION
AND MEANING

by A. Ferrier, B. Hoo
Station de Biochimatologie, I.N.R.A.
F-78000 Versailles

and P. Boursard, C. Grillet, P. Belluomo, P. Vallery
Laboratoire de Télédétection
Station de Biochimatologie, I.N.R.A.
F-78000 Versailles

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY

Summary

The present study analyses data obtained during the Joint Flight Experiment (JFE), France-1977. The flight experiment, which consisted of a consecutive night and day flight and measurements on the ground, was carried out on September 30, 1977 in the region of Vozy, south of Chartres, as a part of the activities of the TELLUS Project of the Commission of the European Communities, Joint Research Centre, Ispra. The results were presented orally at the 4th Meeting of Working Group II of the TELLUS Project at Montesardo (Rome), November 20-21, 1977.

The statistical analysis of the thermal scanner data permitted to establish, with a relative success, criteria for the homogeneity of surfaces. These criteria were used in defining the surface temperature values which are most representative for use in an energy balance approach to evapotranspiration (day) and heat balance (night).

It could be shown for a number of maize fields that airborne thermal scanner data permitted a detailed energy analysis of different fields of a same crop to be carried out. Such a detailed analysis was not necessary for a determination of crop evapotranspiration which could be evaluated from the mean temperature of the crop surface. The remaining step in evaluating regional evapotranspiration consists of determining the mean temperatures of the various types of surface different from each other.

A differential analysis day/night is of interest for enhancing the contrast between types of surfaces, as well as for the determination of the daily energy balance.

It could be stressed that, for a homogeneous region, a study such as the present one, could be carried out on a relatively small part of the total surface, as the results for a surface of 2.5 x 2 km² were not significantly different from those obtained from a surface three times larger.

Correspondence regarding this series of newsletters should be addressed to:

P. REIJGER - Commission of the European Communities
JOINT RESEARCH CENTRE
I-21020 Ispra (Varesi) - Italy

(E81-10040) A STUDY OF RADIOMETRIC SURFACE
TEMPERATURES: THEIR FLUCTUATIONS,
DISTRIBUTION AND MEANING (Institut National
de la Recherche Agronomique) 36 p
HC A03/MF A01

N81-12522

Unclass
00040

CSCL 05B G3/43

ETUDE DES TEMPERATURES RADIOMETRIQUES :
FLUCTUATIONS, REPARTITIONS, SIGNIFICATIONS.

A.Perrier, P.Boissard, B.Létiez, C.Goillot, P.Belluomo et P.Valéry.

INTRODUCTION

Si l'acquisition de données radiométriques dans le domaine de l'infrarouge thermique est quelque chose de plus en plus courant, l'interprétation et la signification de ces données restent toujours difficiles. C'est pourquoi nous avons cherché à analyser dans certains détails les données radiométriques diurnes et nocturnes obtenues grâce à une opération aéroportée sur une région dégagée, homogène, de la Beauce (Bassin parisien).

Cette étude permet de faire ressortir, sous l'angle des températures radiatives de surface, les hétérogénéités, leur répartition et leur signification, en particulier face aux structures connues des zones balayées et, parmi elles, les zones qu'on est appelé à considérer comme homogènes. Dans le cas des diverses études agronomiques qui considèrent les températures radiatives des surfaces comme un bon indice des températures vraies, soit encore du terme d'équilibre du bilan d'énergie, ces surfaces élémentaires dites homogènes sont les parcelles (on entend par parcelle la surface travaillée de façon homogène et, a fortiori dans le cas d'une végétation, recouverte par une même plante semée pratiquement dans les mêmes conditions et avec la même variété).

L'hétérogénéité propre à chaque parcelle à l'échelle considérée (pixel de 10 x 10 m) est mise en évidence face, entre autres, aux hétérogénéités entre parcelles identiques (surfaces de même nature). Ainsi, entre ces

parcelles identiques, les écarts observés et leur signification peuvent être analysés. Bien entendu, dans un second temps, cette connaissance permet une meilleure interprétation des écarts entre surfaces de natures différentes, de même que des écarts jour-nuit sur parcelles identiques.

Une tentative d'explication de la variation de ces écarts suivant la nature des surfaces est également proposée.

Enfin, ces différents écarts significatifs sont aussi schématiquement interprétés en fonction de différences dans les flux de chaleur latente et en fonction des répercussions qu'ils peuvent entraîner dans l'estimation des évaporations moyennes et la détermination des divers types de surface.

I - PRESENTATION GLOBALE DES DONNEES

1/ Conditions expérimentales

Les données utilisées concernent la partie commune au double scanning (jour et nuit) fait le 30.09.77 dans la région de Voves (*) et centrée autour du site de recherches atmosphériques (soit une zone de 2,7 x 6,5 Km).

Les données thermiques ont été acquises à l'aide d'un radiomètre Daedalus opérant dans la bande 8-14 μ m depuis une altitude de 1 700 m par rapport au sol. Ces données représentent environ, tant de jour que de nuit, 160 000 pixels recouvrant 70 parcelles individualisées et répertoriées pour l'analyse, soit 56 % de l'ensemble de la scène balayée.

La nature des surfaces, relevée sur le terrain et reportée sur le parcellaire (Fig.1), est très variée ; dans cette étude, nous n'avons retenu

(*) Site de recherches atmosphériques (ATP-INAG) situé dans la région parisienne dont les coordonnées sont: sud de Chartres (48°13'42" nord et 1°36'01" est). Les données ont été acquises dans une opération aéroportée conjointe (JFE-France 1977) coordonnée et financée dans le cadre du Projet TELLUS par la Commission des Communautés Européennes, Centre Commun de Recherche, Ispra.

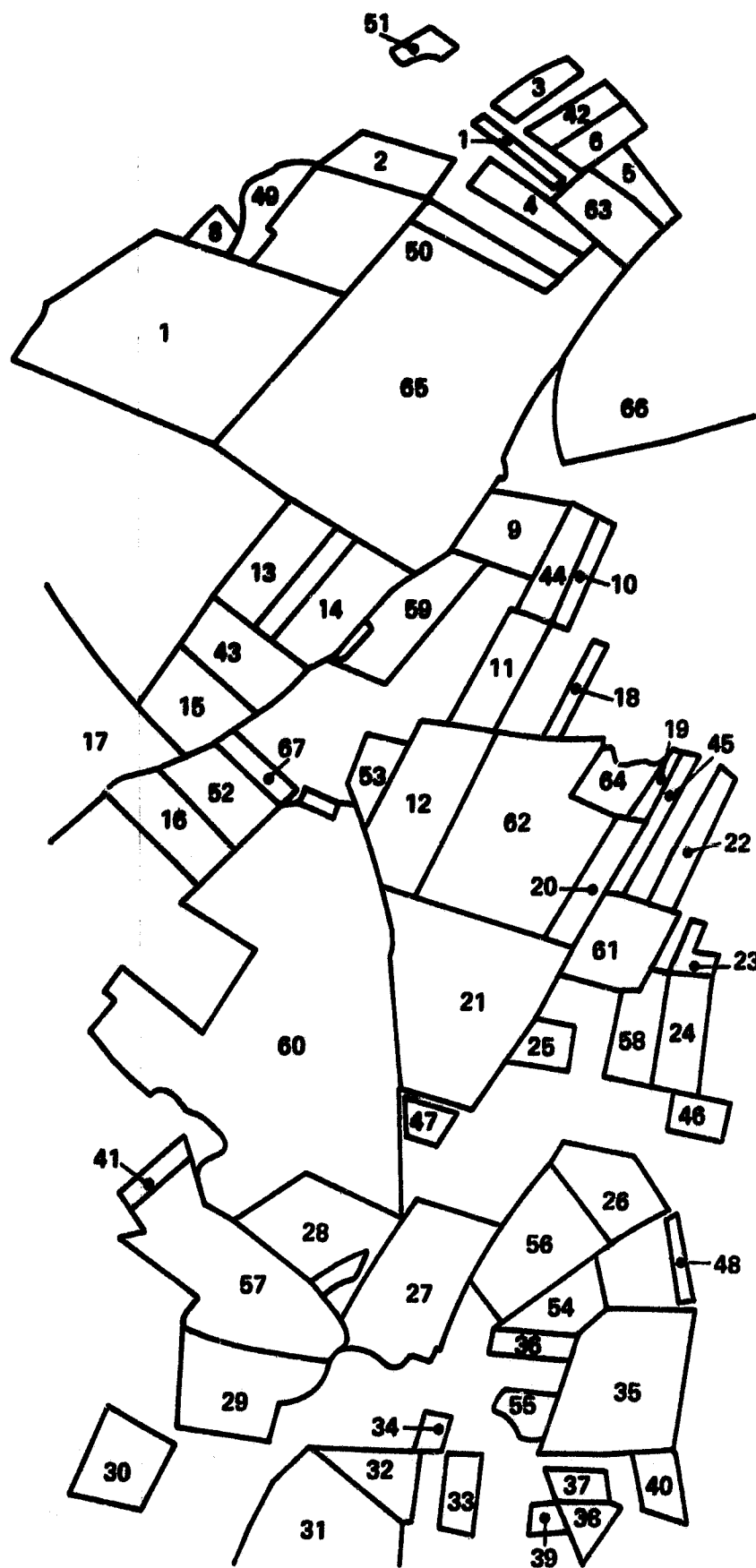


Fig. 1. Parcellaire de la zone de vol (chaque parcelle retenue porte un numéro: cf. annexe II).

que les principaux types, soit : le Maïs (25 % des surfaces : 40 000 px), la Betterave (2 % des surfaces : 3 000 px), le Colza (2 % des surfaces : 3 000 px), les forêts (1 % des surfaces : 1 500 px), les labours (22 % des surfaces : 35 000 px) et les parcelles encore avec chaume (4 % des surfaces : 6 000 px).

Ce parcellaire a été introduit sous forme numérique en mémoire graphique. Ceci le rend superposable aux données infrarouge thermique présentes en mémoire-image : ainsi chaque parcelle peut être analysée individuellement en fonction des valeurs correspondant à chacun de ses pixels ou être associée aux autres parcelles de même nature pour une étude plus globale de la surface analysée.

Conditions atmosphériques - Lors des vols, les conditions générales ont été stables de jour comme de nuit : sur le site, le vent à 1 m du sol était régulier, atteignant 6 m/s au maximum ; il fut respectivement de 0,5 m/s et 4 m/s lors des vols de nuit et de jour. Le temps était clair : on a mesuré dans la bande 0,3-3 μ m (thermopile de Moll) un rayonnement global incident d'environ 500 W/m² au moment du vol de 13h TU.

2/ Calibration des données

Les données ont été calibrées de deux façons :

a) En se fondant sur l'étalonnage interne du radiomètre.

Deux corps noirs (un chaud et l'autre froid) ont des températures réglables (T_{min} , T_{max}) de manière à encadrer la gamme des températures à mesurer. A chaque ligne de balayage, un calage du signal est donc effectué.

Un défaut de réglage du corps noir froid a été observé lors du vol de nuit : réglage établi à 0°C alors qu'il y avait des températures négatives au sol. Ce défaut est très apparent sur certains histogrammes du vol de nuit

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY

qui sont nettement tronqués en-dessous de 0°C (Cf. Fig. 4, 9a, b).

En faisant l'hypothèse d'une loi de calibration linéaire entre T_{\min} et T_{\max} , chaque valeur lue sur la bande est convertie en température équivalente de corps noir par interpolation. Compte tenu de la gamme des températures explorées, cette approximation semble justifiée. Elle introduit une erreur qui peut atteindre au plus 0,5°C pour les températures de milieu de gamme (20°C) de jour.

b) En comparant les valeurs obtenues par télédétection et les valeurs mesurées au sol par radiothermomètre Barnes portable et thermocouples en série (disposition en araignée).

3/ Les températures radiatives

L'analyse portera uniquement sur les données brutes correspondant, pour le vol de jour par exemple, à 255 niveaux permettant de couvrir une gamme de 19°C répartis, dans ce cas particulier, entre 12 et 31°C.

Le premier test effectué a simplement consisté à vérifier si l'angle de prise de vue n'avait pas d'effet sur les températures radiatives obtenues après corrections angulaires classiques ; dans ce but, une température moyenne pour chaque ligne parallèle au vol a été calculée, l'évolution de ces températures (Fig.2) ne soulignant aucun effet de bord systématique.

La température moyenne d'une surface S comprenant n pixels étant définie par :

$$\bar{T}_S = \sum_0^n T_i / n$$

Chaque parcelle ou groupe de parcelles sont aussi caractérisés par leur spectre de fréquence de répartition des températures. Ce type d'ana-

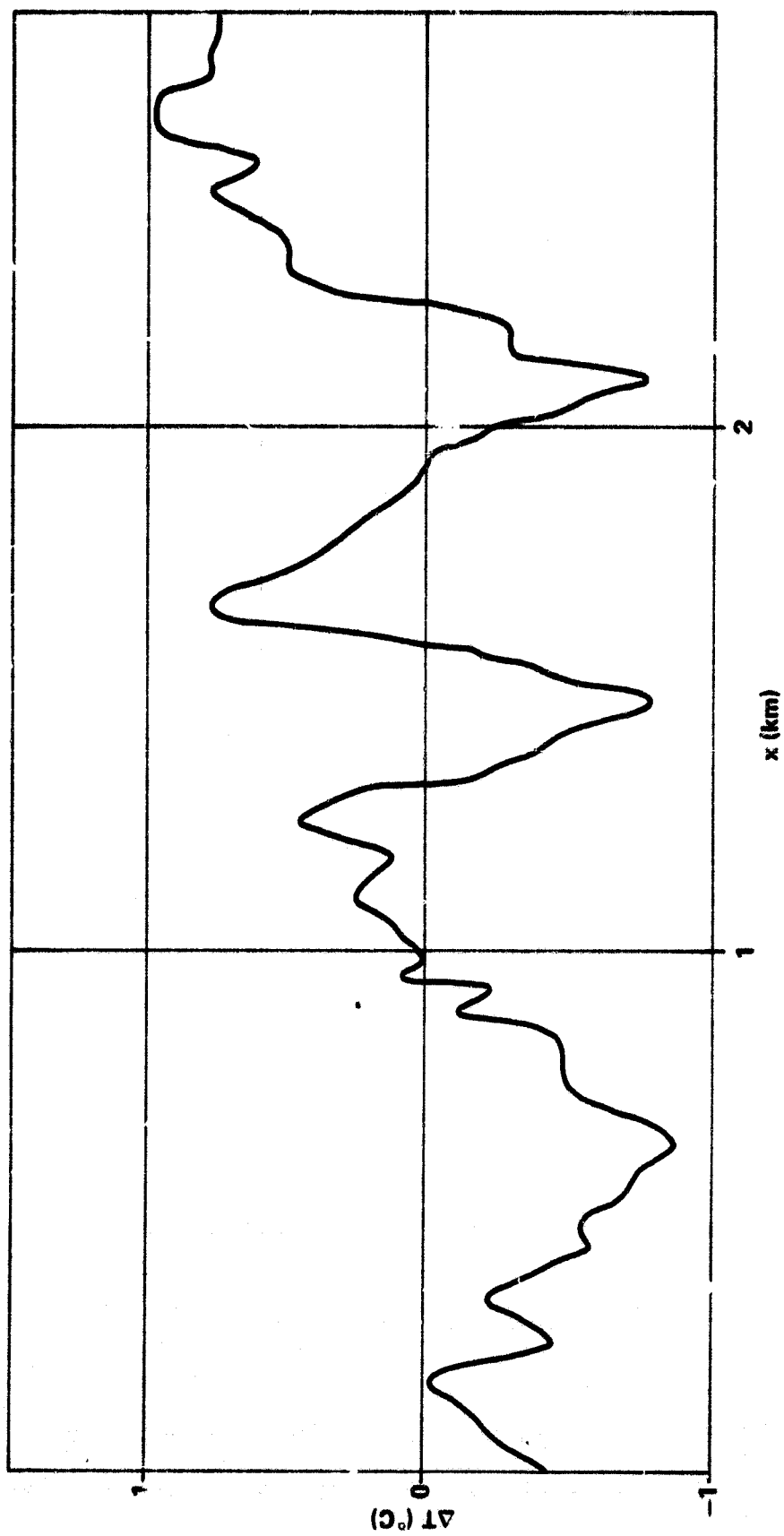


Fig. 2. Evolution, en fonction de la largeur de la scène, des températures moyennes diurnes de chaque ligne parallèle à la direction du vol.

lyse permet, d'une part, de définir le degré d'homogénéité de la parcelle et, d'autre part, de préciser si l'unité retenue au sol ne présente pas des sous-unités. En effet, les spectres sont toujours bien représentés par des courbes de Gauss (Fig.3) ; un spectre plurimodal (Fig.3 no.17) révèle, de façon plus ou moins nette, la non-homogénéité et la présence de sous-unités distinctes.

La largeur du spectre représente, dans le cas d'une ou plusieurs parcelles dont le spectre peut être considéré comme unimodal, un bon indice du degré d'homogénéité ou d'hétérogénéité de cet ensemble.

Si la symétrie des courbes de type gaussien n'est pas parfaite et présente souvent des dérives prolongées mais de faibles amplitudes (Fig.4), c'est essentiellement dû au parcellaire qui, par nature, crée au voisinage des limites des hétérogénéités prononcées (contraste entre deux types de surface de températures radiatives très différentes ou simplement fourrière, chemin d'accès, route, ...).

Dans cette étude, tous les points limites du parcellaire ont donc été rejetés pour éviter ces dispersions naturelles. Ces dispersions permettent cependant, dans beaucoup de cas, de définir, par rapport aux différents types de surface inclus dans l'analyse, si les parcelles considérées appartiennent au groupe des surfaces caractérisées par de fortes températures radiatives ou, au contraire, par de faibles températures.

Cet aspect se trouve très bien décrit (Fig.4) par la comparaison des spectres des températures des surfaces de Maïs et de sol nu qui présentent un déséquilibre très prononcé (queue de spectre) d'un côté ou de l'autre suivant la position moyenne du spectre (plus chaud ou plus froid).

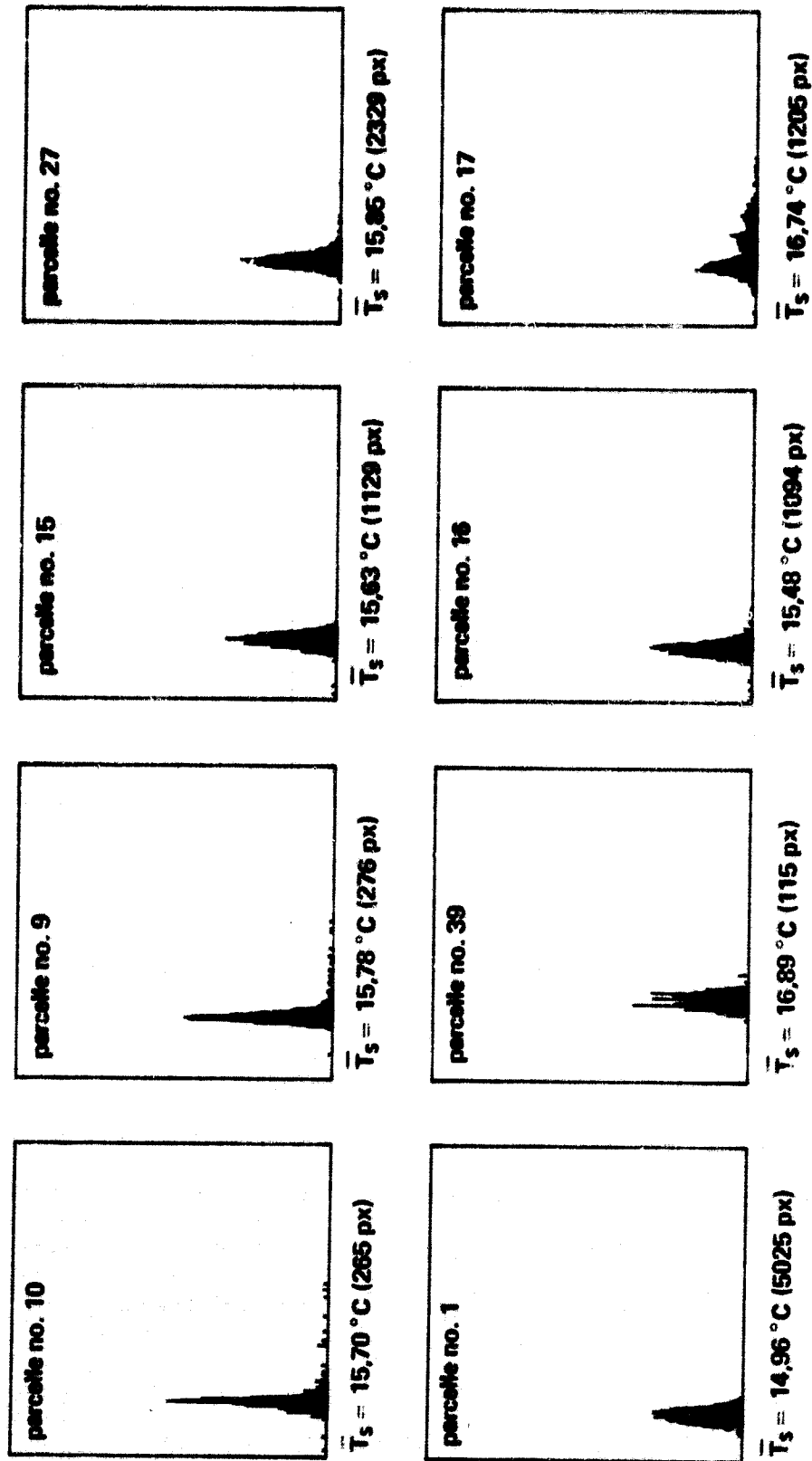


Fig. 3. Spectre des fréquences (unité arbitraire) de répartition des températures de diverses parcelles de Maïs, les zones de bordure ayant été déduites. \bar{T}_s température radiométrique moyenne de la parcelle

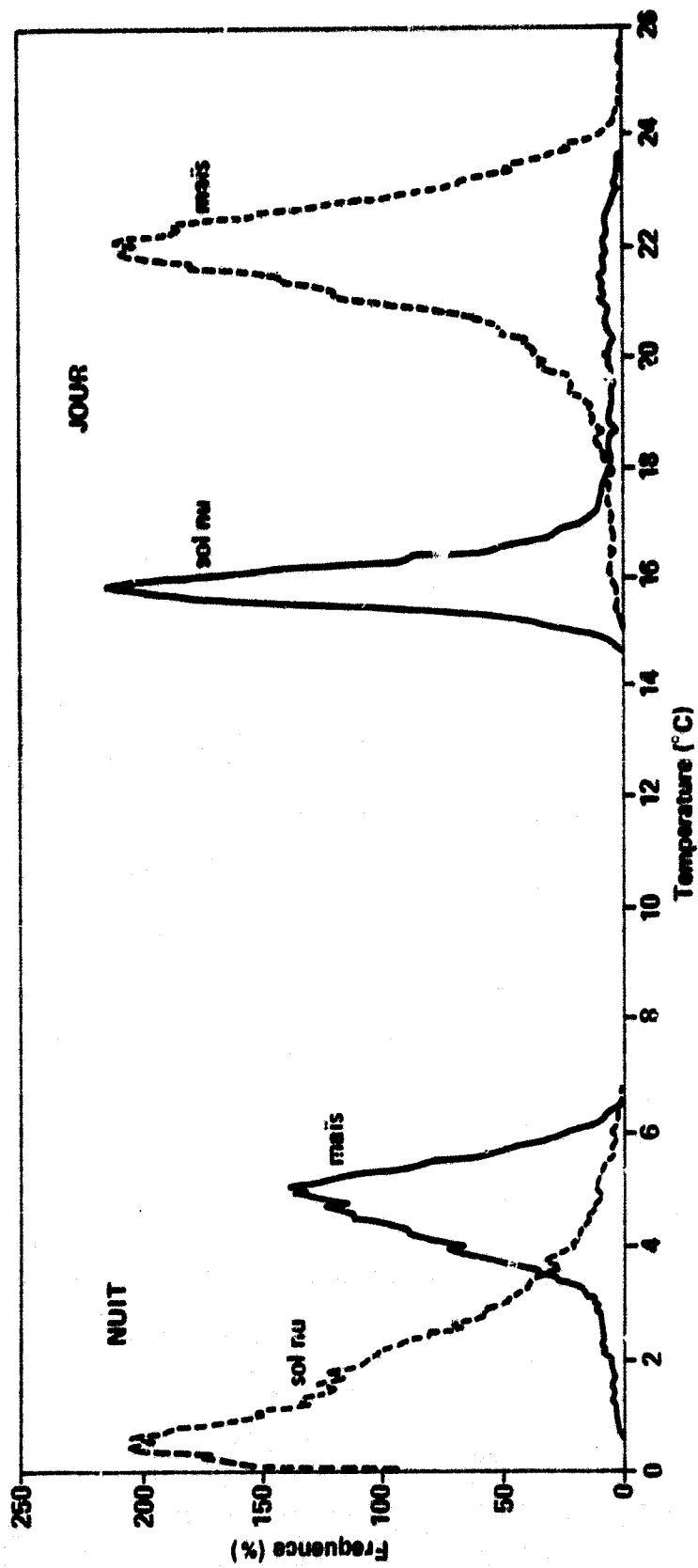


Fig. 4. Spectre des fréquences (unité arbitraire) de répartition des températures jour et nuit pour le Maïs (---) et pour le sol nu (—) (bordures non déduites, d'où les queues de spectre).

II - ETUDE DES TEMPERATURES RADIATIVES DU MAIS

Le choix du Maïs dans cette étude correspond d'une part à son importance en surface, mais aussi à son homogénéité par rapport aux surfaces en chaume et en labour qui, quant à elles, revêtent des aspects très différents suivant l'état dans lequel elles se trouvent en fonction des techniques culturales subies.

1/ Analyse régionale

Une première analyse a porté sur environ le tiers de la surface totale (27 %) prise autour du site expérimental (Fig.5) ; ce qui conduit, pour le Maïs, à l'étude d'une surface de 9 % par rapport à l'ensemble de la zone étudiée.

Les spectres obtenus (Fig.6), pour les données de jour comme de nuit, conduisent aux valeurs moyennes de 15,7°C de jour et 3,4°C de nuit, avec un écart type σ d'environ 0,5°C. La même analyse faite sur l'ensemble de la surface, donc sur une surface trois fois plus grande, (Fig.6), conduit à des valeurs pratiquement identiques (15,7°C de jour et 3,8°C de nuit), soulignant cependant une légère dérive de la température de nuit, un peu plus élevée, sur l'ensemble de la surface et un léger accroissement de la dispersion tant de jour que de nuit ($\sigma = 0,7^\circ\text{C}$). Notons que les spectres restent très symétriques et unimodals, précisant bien l'homogénéité des surfaces de maïs considérées au niveau de la région étudiée.

Si, au lieu de considérer les moyennes précédentes vraies, on tient compte des températures moyennes de chaque parcelle (au nombre de 9 dans l'étude partielle, annexe I, et de 41 dans l'étude globale, annexe II ; les surfaces pouvant être dans un rapport de 1 à 40), la dérive due à la non pondération des surfaces est faible puisque, par rapport aux valeurs pondérées mentionnées ci-dessus (15,7°C pour les deux zones), on a :

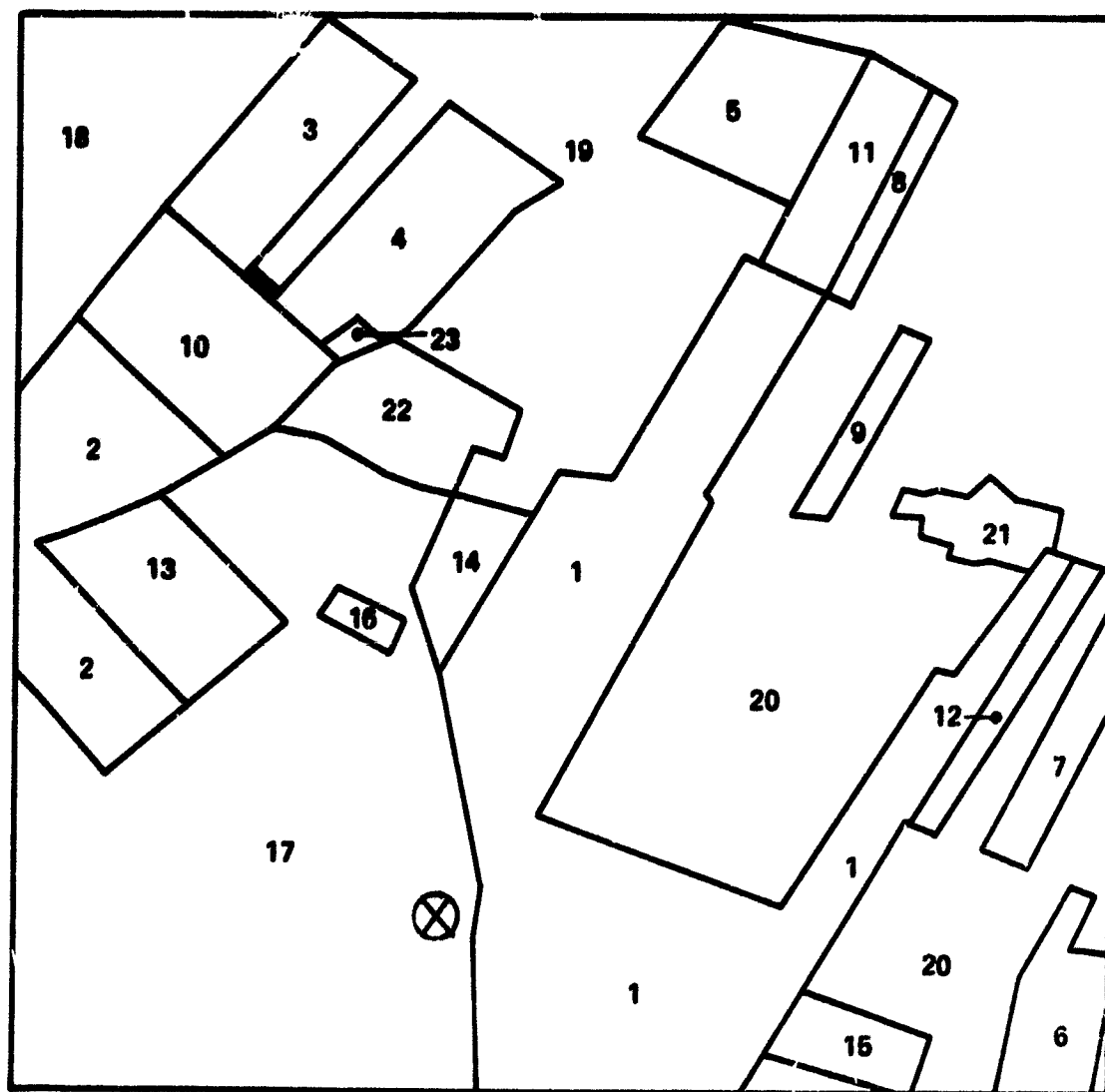


Fig. 5. Parcelle réduite, utilisé dans une première analyse (cf. annexe I); site expérimental de recherches atmosphériques: ⊗

$\bar{T}_{\text{total}} = 15,9$ erreur sur la moyenne 0,07
écart type 0,40

$\bar{T}_{\text{partiel}} = 15,9$ erreur sur la moyenne 0,11
écart type 0,30

2/ Analyse parcellaire

Il nous a paru important d'essayer de préciser si les spectres globaux présentés (Fig.6) correspondaient :

- soit à des parcelles pratiquement identiques ayant même valeur moyenne

$\bar{T}_p \sim 15,7$ et même dispersion σ ($0,5 < \sigma < 0,7$) ;

- soit à des parcelles de températures différentes mais de répartition gaussienne qui auraient naturellement une dispersion plus faible ($0,3 < \sigma < 0,4$).

La dérive de l'écart type σ entre l'étude partielle et l'étude totale suggérerait que l'accroissement de la surface explorée conduisait à prendre en compte soit des parcelles moins homogènes (explication de la valeur observée de σ plus grande), soit des parcelles d'état légèrement différent comprenant à la fois des parcelles ayant des températures radiatives moyennes propres plus basses et des parcelles ayant des températures plus élevées que celles observées dans le premier échantillon.

Pour cela, une étude spectrale de parcelles, ayant soit la même température moyenne ($15,62 < \bar{T}_p < 15,85$) mais des surfaces croissantes (allant d'environ un hectare à vingt-cinq hectares), soit des températures moyennes très différentes, a été effectuée (Fig.3). L'analyse ne révèle pratiquement aucun accroissement de la dispersion en fonction des surfaces, l'hétérogénéité d'un hectare étant voisine de celle de vingt-cinq (Fig. 7a), l'écart type étant d'environ $0,4^\circ\text{C}$ ($6\sigma \sim 2,5^\circ\text{C}$ base des spectres).

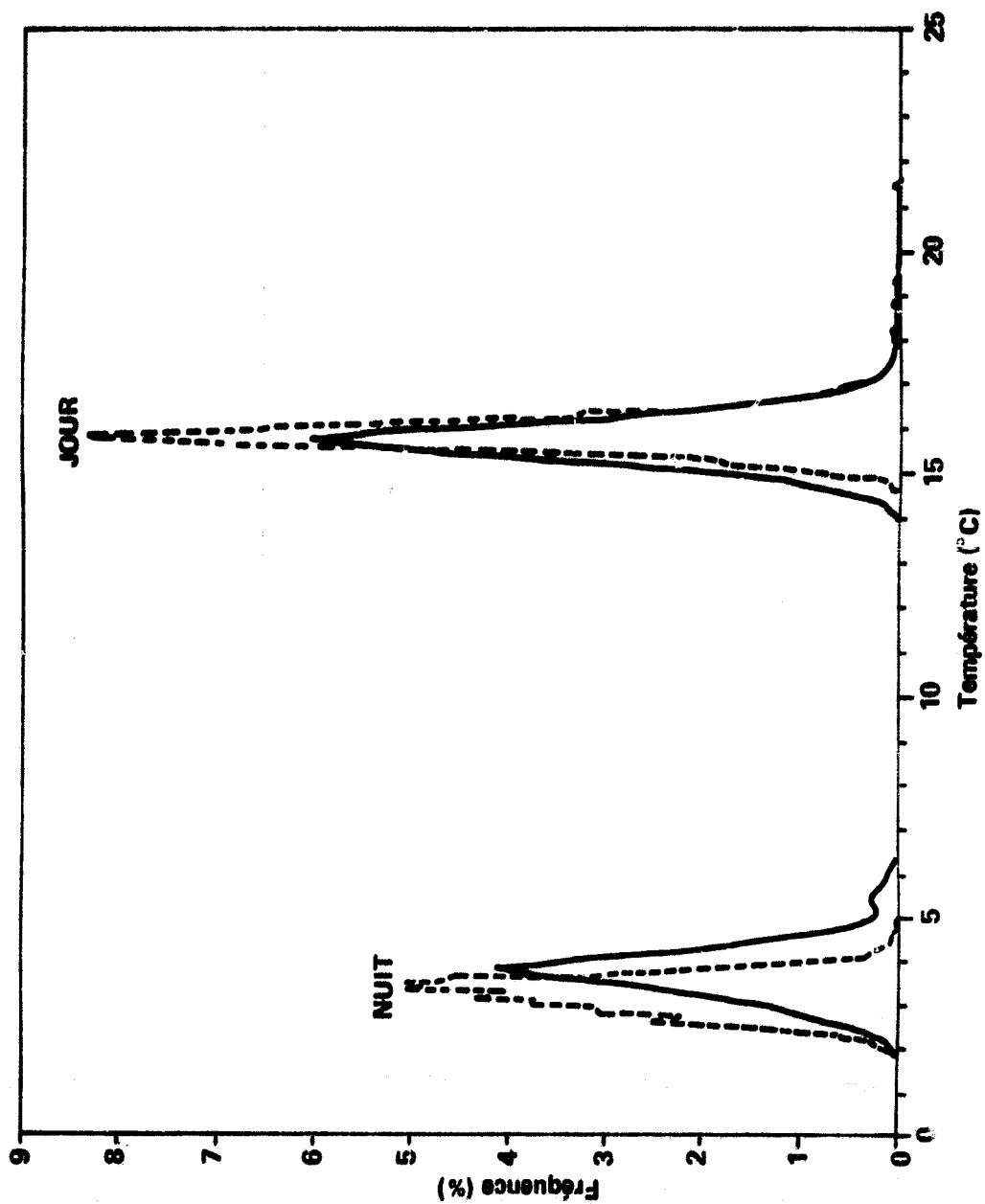


Fig. 6. Spectres comparés jour et nuit du parcellaire total (—) et du parcellaire réduit (---) dans le cas du Maïs.

Ces valeurs de dispersion sont naturellement les mêmes pour les autres parcelles, en particulier celles caractérisées par des températures extrêmes différentes (Fig.7b) ; cette particularité souligne la différence significative de température qui peut exister entre les parcelles et, bien entendu, surtout celle ^{ayant} la température minimale observée $\bar{T}_m \sim 14,96^\circ\text{C}$ (parcelle 1) et ^{celle ayant} la température maximale $\bar{T}_M \sim 16,89^\circ\text{C}$ (parcelle 39). En effet, ces deux températures peuvent être considérées comme différentes avec une probabilité voisine de 1 à mieux que 10^{-3} près. On retrouve les mêmes caractéristiques entre les deux parcelles les plus proches l'une de l'autre (n°36 et 39), tout en ayant les températures les plus différentes, soit respectivement $15,11^\circ\text{C}$ et $16,99^\circ\text{C}$. Il est possible d'en déduire qu'une température radiative de parcelle de Maïs, \bar{T}_x , sera pour cette scène significativement différente d'une autre T_o (seuil 5 %) pour $\bar{T}_x \neq \bar{T}_o \pm 0,9^\circ\text{C}$.

Dans ces conditions, le spectre global des températures (dispersion de $6\sigma \sim 4^\circ\text{C}$) ne peut que représenter l'intégration de parcelles dont la température moyenne diffère au plus d'environ 2°C (Fig.7b).

l'hétérogénéité entre les parcelles (environ 2°C) et l'hétérogénéité intraparcellaire ($\pm 2\sigma$ soit environ $1,8^\circ\text{C}$) sont du même ordre.

3/ Différence significative des températures radiatives et évapotranspiration

Un des points importants concernant l'utilisation des températures radiatives est celui de la détermination des évapotranspirations des parcelles ; dans la mesure du possible, une estimation de l'évapotranspiration régionale est également recherchée.

Il est inutile de rappeler toutes les données théoriques classiques, mais il faut simplement dire que, dans la mesure où les températures

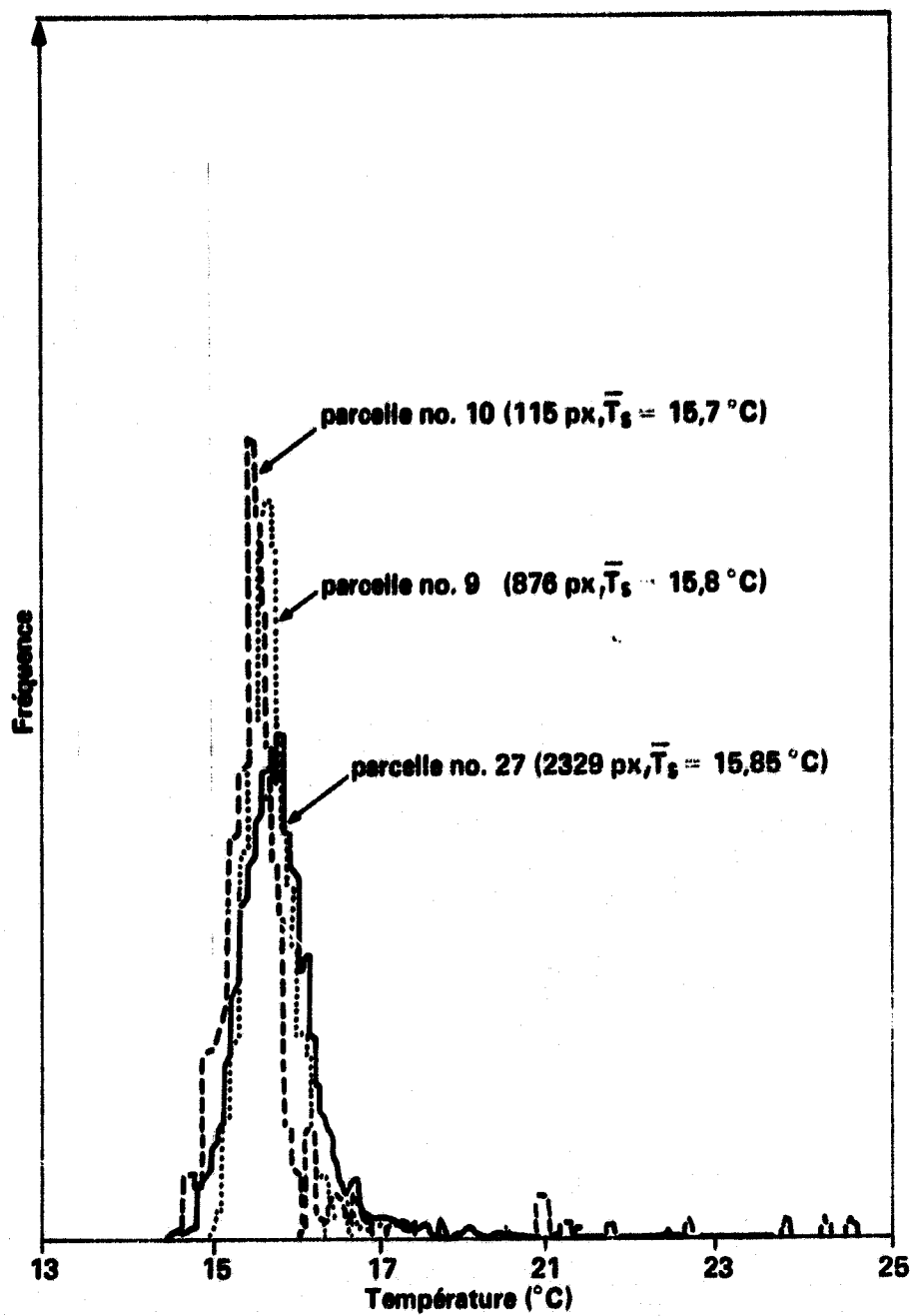


Fig. 7a. Spectre de trois parcelles de Maïs ayant une même température de surface et des surfaces différentes.

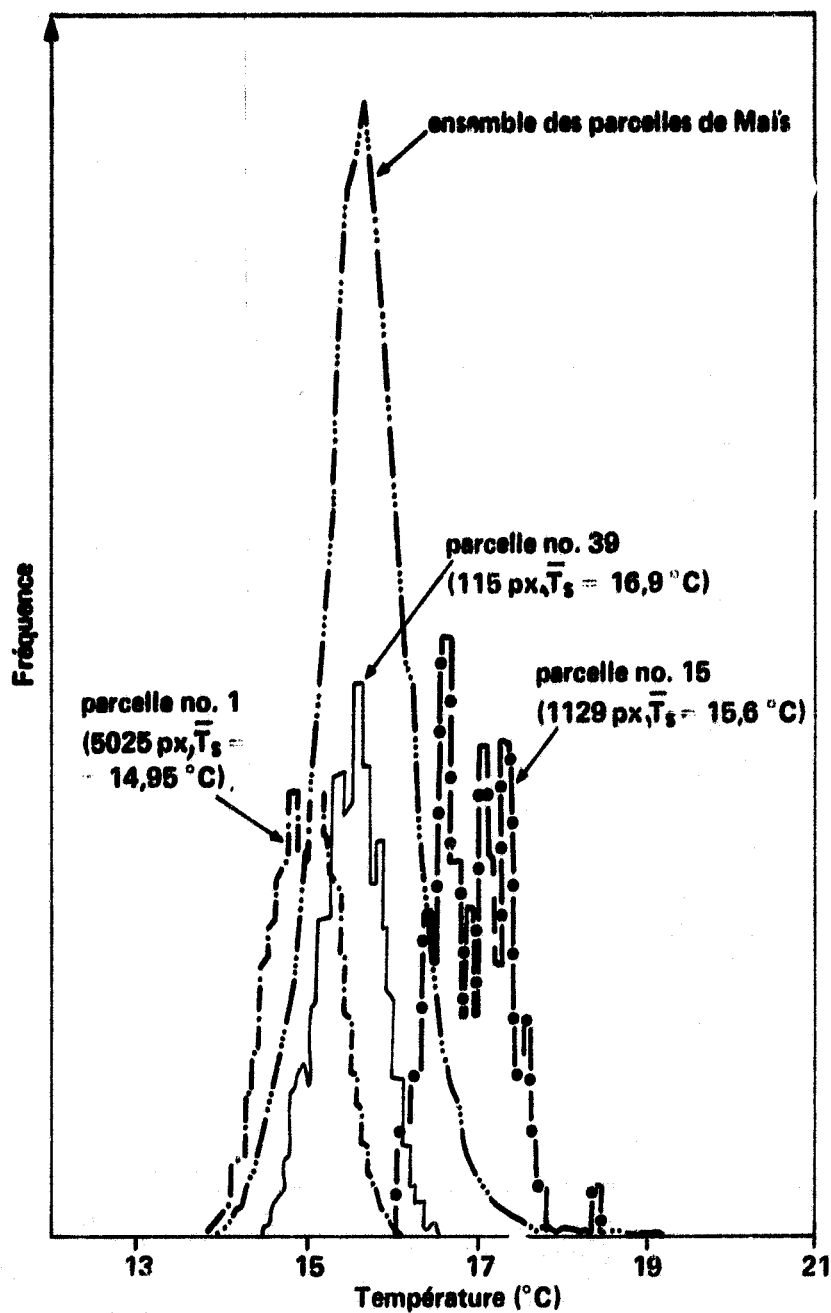


Fig. 7b. Comparaison des spectres de trois parcelles de Maïs de température moyenne différente par rapport au spectre de l'ensemble des parcelles de Maïs (—...—).

radiatives T_R n'ont pas été perturbées par la couche d'air traversée, on a :

$$ET = (Rn^* + G) - [\rho c_p h(U, \Delta T) + 4 \epsilon \sigma T^3] (T - T_a)$$

ET : évapotranspiration ($W m^{-2}$)

Rn^* : rayonnement net climatique, soit $((1 - a)R_g + \epsilon R_a - \epsilon \sigma T_a^4)$.

R_g : rayonnement global ($W m^{-2}$)

R_a : rayonnement atmosphérique ($W m^{-2}$)

G : flux conductif de chaleur à la surface du sol ($W m^{-2}$)

T : température de surface ($^{\circ}K$) soit, si T_R est la température radiative ($T = T_R / \sqrt[4]{\epsilon}$).

T_a : température de l'air ($^{\circ}K$)

a : albédo de surface

ϵ : émissivité de la surface

$h(U, \Delta T)$: coefficient d'échange entre la surface et le niveau de référence où T_a et la vitesse U sont mesurées ($m s^{-1}$) et ΔT représente l'écart ($T - T_a$) qui joue sur la correction de stabilité ou d'instabilité.

ρ, c_p, σ : la masse volumique de l'air, la chaleur massique de l'air et la constante de Stefan-Boltzman.

Ainsi, dans la mesure où Rn^* et G sont connus et supposés identiques pour les surfaces de même nature, comme U et ϵ , alors ET devient à un moment donné fonction des écarts ($T - T_a$).

Dans ces conditions, certes simplistes, et en utilisant les valeurs corrigées en ΔT de $h(U, \Delta T)$, il est possible de définir les différences d'évaporation induites par les écarts $T - T_a$ observés.

Dans le cas des parcelles de Maïs et pour les valeurs obtenues pendant le moment du vol ($Rn \sim 300 W m^{-2}$; $G \sim -30 W m^{-2}$; $T_a = 17^{\circ}C$ et $U = 4,5 m s^{-1}$), des écarts de $1^{\circ}C$ conduisent à des variations pouvant atteindre $100 W m^{-2}$ sur l'évapotranspiration du Maïs (Fig.8).

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY

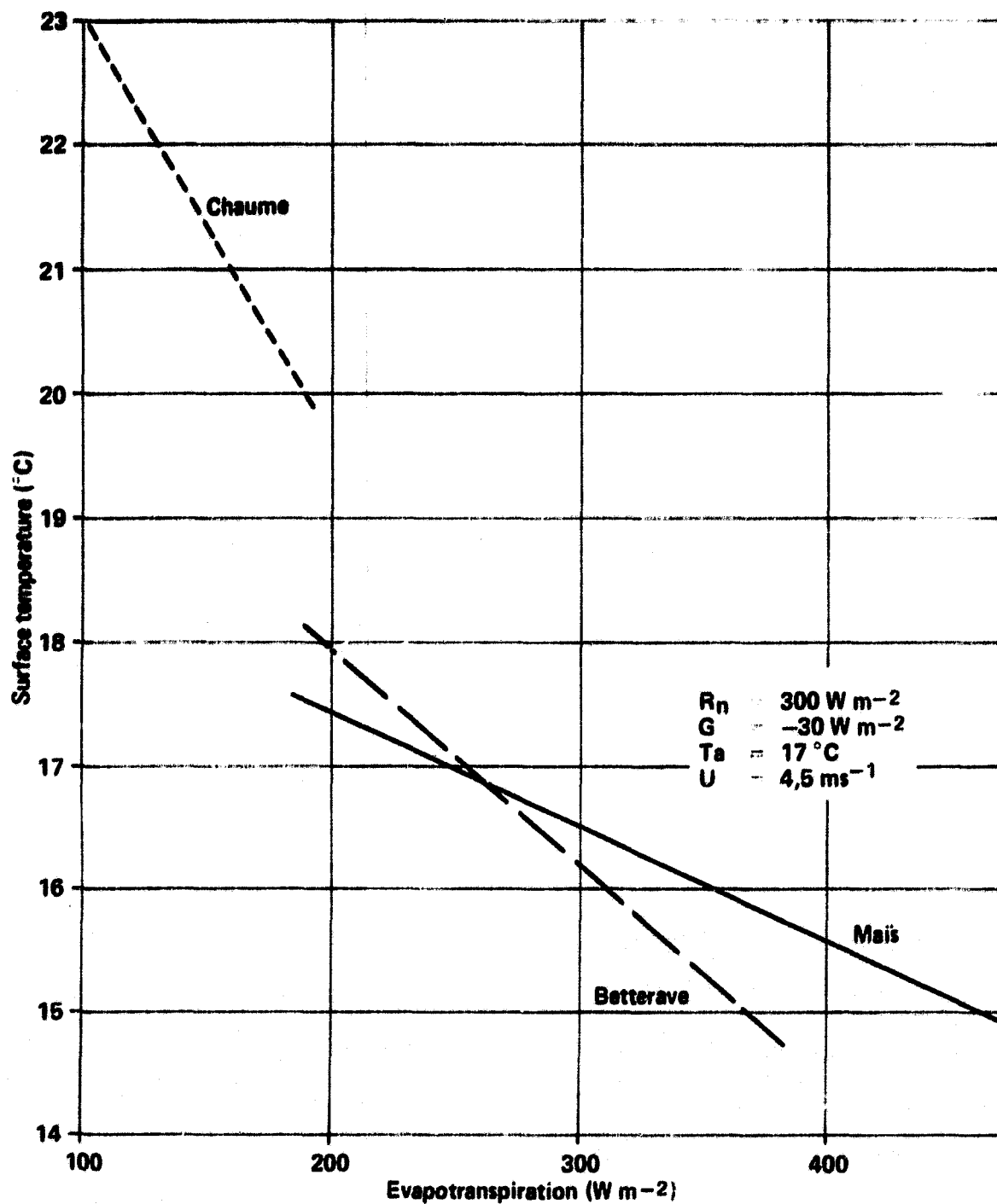


Fig. 8. Relation calculée entre température de surface et évapotranspiration pour trois types de surface dans les conditions du vol de jour

La précision intrinsèque sur l'évapotranspiration d'une parcelle reste faible ($\pm 90 \text{ W m}^{-2}$). Cependant, entre les diverses parcelles, des différences entre 50 à 200 W m^{-2} peuvent être mises en évidence, ce qui est déjà fort appréciable.

Enfin, notons que, compte tenu de la faible non linéarité de la formule, l'évapotranspiration moyenne de l'ensemble des parcelles ($\sum_0^n ET_i / n \sim 396 \text{ W m}^{-2}$) est identique à celle calculée directement à partir de la température moyenne vraie ($\bar{T}_s = 15,7$, soit $ET \sim 396$) ou même dans ce cas particulier de la température moyenne des parcelles non pondérées par les surfaces ($\bar{T}_s = 15,9$, soit $ET \sim 380$).

Ceci souligne l'intérêt des valeurs moyennes de températures radiatives relatives à des surfaces de même nature.

III - ETUDE COMPAREE DES TEMPERATURES MOYENNES DES DIVERS TYPES

DE SURFACE : JOUR ET NUIT

1/ Analyse globale des différences

Une comparaison globale est donnée (Fig.9a, b) et illustrée par l'ensemble des spectres de répartition des températures jour et nuit pour les différents types de surface définis.

Le tableau suivant récapitule l'ensemble des résultats :

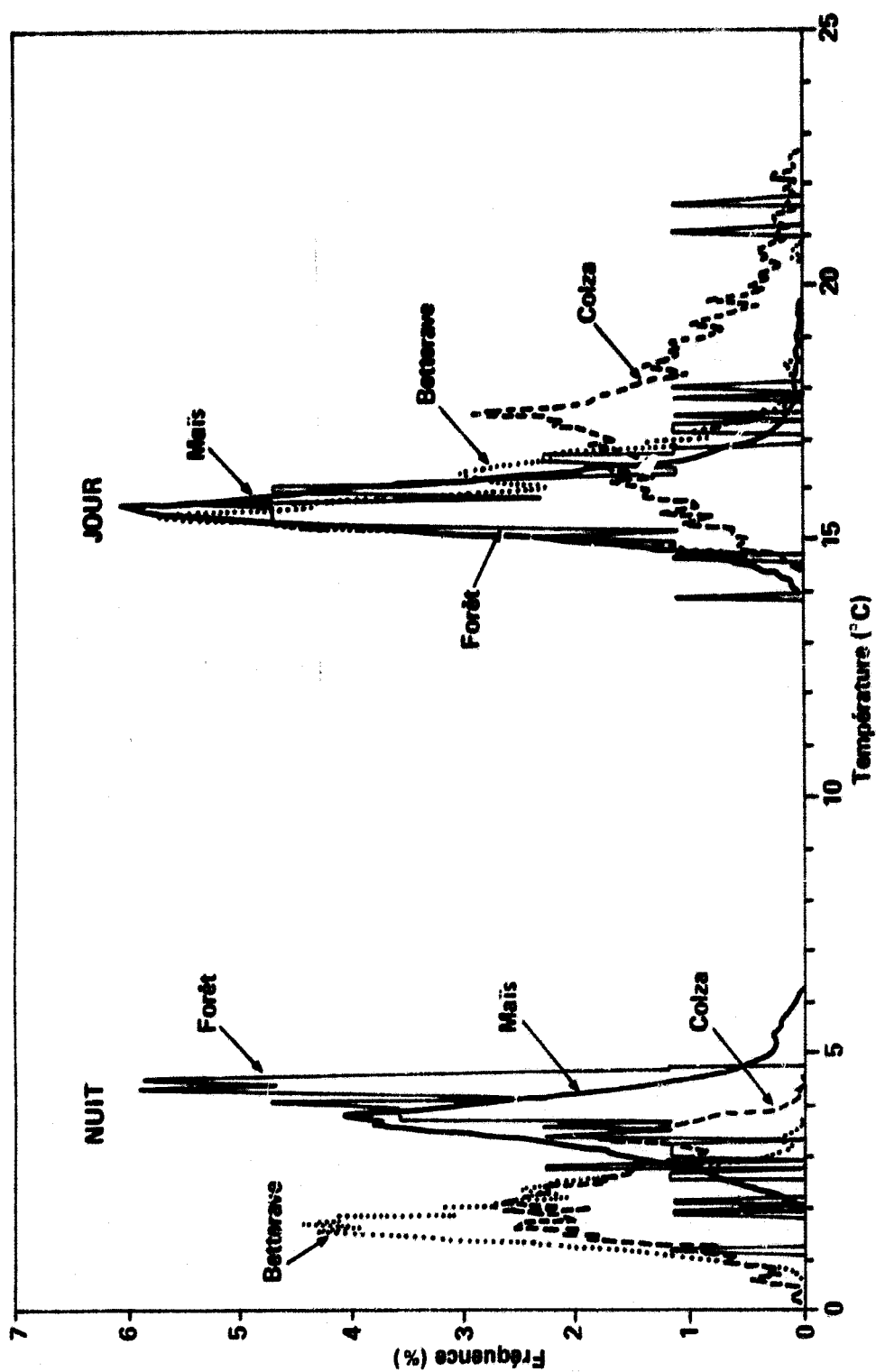


Fig. 9a. Spectres comparés jour et nuit des diverses surfaces végétales (— Forêt; Maïs; ----- Betterave; — — Colza)

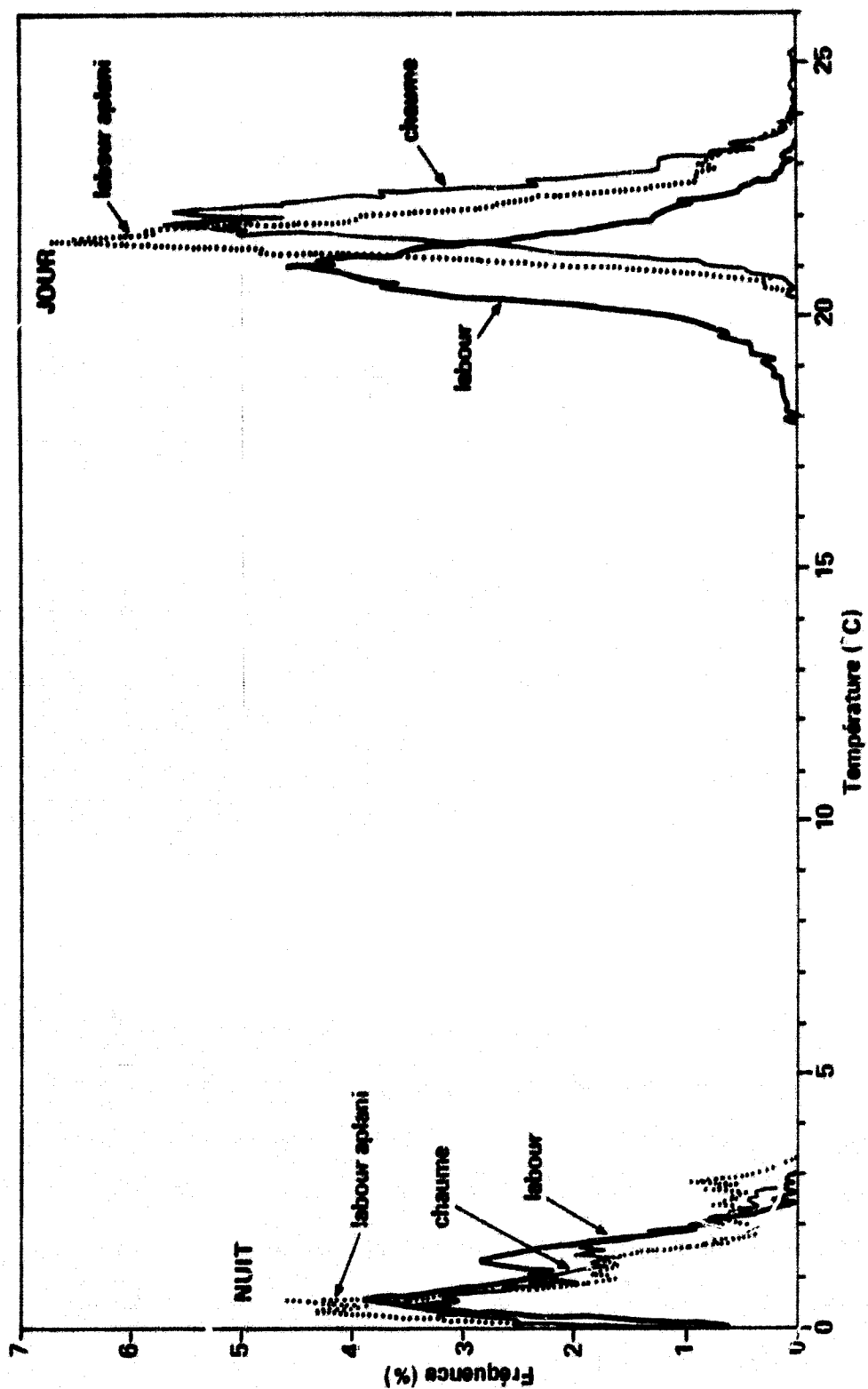


Fig. 9b. Spectres comparés jour et nuit des diverses surfaces de sol (— labour; labour aplani; --- chauxne).

	Maïs	Bette- rave	Colza	Bois	Labours	Labours aplanis	Chaumes
JOUR Température moyenne vraie (moy. valeurs des pixels)	15,7	16,0	17,4	15,7	21,0	21,6	22,1
Température moyenne des parcelles	15,9	16,3	17,6	-	21,1	21,3	22,3
Ecart type	0,4	0,6	1,5	-	0,4	1,0	0,3
Erreur sur la moyenne	0,07	0,2	0,5	-	0,2	0,4	0,2
Température moyenne (valeur centrale du spectre)	15,7	16,0	17,7	15,7	21,0	22,2	22,2
Largeur du spectre (6σ)	4,0	3,5	6,5	2,6	4,0	3,4	3,2
NUIT Température moyenne des parcelles	3,6	2,0	2,3	4,0	1,1	1,2	1,1
Ecart type	0,6	0,4	0,7	-	0,5	0,8	0,5
Erreur sur la moyenne	0,1	0,2	0,3	-	0,3	0,3	0,2

Il est intéressant de noter les valeurs assez constantes (entre 3 et 4°C) de la largeur des spectres. Une exception correspond au spectre des températures du Colza (largeur de 6,5°C), parcelles très hétérogènes du fait du stade de post-émergence, certaines zones couvrant déjà relativement bien le sol, d'autres étant pratiquement du sol nu. La seconde exception correspond au spectre des températures de la forêt qui n'inclut malheureusement que deux petites parcelles.

Même si les différentes façons de calculer les températures moyennes conduisent à des résultats très homogènes - mieux que $0,3^{\circ}\text{C}$ dans l'ensemble avec une seule exception : celle de la température des labours aplanis calculée à partir du spectre qui présente une évidente petite hétérogénéité - il est pratiquement impossible de dissocier plus de deux groupes différenciés : celui des couverts végétaux (Bois, Maïs, Betterave) et celui des sols nus (labours, labours aplanis, chaumes) ; le Colza voisin des couverts végétaux s'en dissocie cependant pour les raisons invoquées précédemment.

Naturellement, de jour, l'énergie radiative reçue accroît les différences entre parcelles à forte évaporation (surfaces végétales ET $\sim 380 \text{ W m}^{-2}$ pour le Maïs et 320 W m^{-2} pour la Betterave) et les parcelles de sol nu (entre 130 W m^{-2} pour les chaumes et 180 W m^{-2} pour les labours), l'écart maximum atteignant environ 6°C entre ces deux groupes. De nuit, le bilan radiatif avec l'atmosphère conduit à des échanges d'énergie plus faibles que ceux liés à l'énergie solaire, aussi les écarts observés sont-ils plus faibles ($2,5^{\circ}\text{C}$).

La comparaison des valeurs jour-nuit fait ressortir qu'aux valeurs les plus chaudes de jour correspondent les valeurs les plus froides de nuit.

Il résulte de ces observations que les amplitudes passent d'environ $12,5^{\circ}\text{C}$ pour le Maïs à 21°C pour la surface de chaume de faible évaporation et de faible capacité calorifique (surface bien isolée du sol et de sa forte masse calorifique).

Les différences nocturnes qui apparaissent entre Betterave, Maïs et Forêt (phénomènes radiatifs et convectifs), alors que leurs températures sont voisines de jour (dominance de l'évaporation), peuvent s'expliquer principalement par le fait que généralement avec un couvert verticalement développé une proportion non négligeable de l'intérieur du couvert

est vue par le capteur. Or, il est bien établi que toute partie interne du couvert bénéficie d'échanges radiatifs avec les autres parties, tout en étant convectivement beaucoup plus protégée que la surface ; aussi, de nuit, il s'ensuit une perte d'énergie réduite des zones internes par rapport à celles du sommet du couvert et, par voie de conséquence, leurs températures sont plus élevées. La température radiative moyenne du couvert développé aura donc toujours tendance à être plus chaude. En effet, même si ce couvert devenait très dense en surface, ce qui le rapprocherait des conditions radiatives d'un couvert bas et ferait disparaître l'explication précédente, il n'en resterait pas moins que, pour des zones où les couverts hauts ne sont pas prépondérants, les raisons suivantes interviennent toujours pour concourir à ces constatations :

- les échanges convectifs sont d'autant plus intenses que les couverts sont plus hauts (fort coefficient d'échange), ce qui tend à réduire d'autant plus leur refroidissement nocturne dû aux phénomènes radiatifs ;
- les échanges convectifs se faisant avec l'air, la température de l'air joue un rôle dominant et elle a toujours tendance à être de nuit d'autant plus chaude qu'on la considère à un niveau plus élevé (hauteur des couverts) ;
- enfin, la capacité calorifique du système air-végétation croît avec la taille du couvert.

2/ Exploitation des différences de températures jour et nuit

Considérons, à titre d'exemple, deux parcelles n°1 et n°65 (Fig.1) qui sont toutes deux de grande dimension. La première est en Maïs, la seconde est une surface labourée. Elles sont contiguës et ont sensiblement la même superficie : 50 ha.

Les données thermiques de jour et de nuit ont été corrigées géométriquement : il est donc possible de calculer, pour chaque pixel, la différence $\Delta T = T_j - T_n$ représentant l'écart thermique entre 13h et 1h TU.

On trouvera en figure 10 d'une part le spectre des températures de chaque parcelle pour les deux moments de la journée et d'autre part le spectre de la différence ΔT (pixel à pixel) entre jour et nuit pour les deux types de surface.

Si l'on considère seulement les températures de ces deux types de surface (sol et végétation), on constate un écart de 4 à 5°C à 13h et à peu près le même à 1h TU. En revanche, si l'on compare maintenant les écarts thermiques ΔT calculés pour le sol et la végétation, on constate une différence d'environ 9°C ($\Delta T_{\text{sol}} - \Delta T_{\text{vég}} \sim 9^\circ\text{C}$).

Du point de vue de la dispersion des valeurs, on observe un écart type sur $\Delta T_{\text{vég}}$ sensiblement le même que celui sur $T_{\text{vég}}$ à 13h et, par contre, un écart type de ΔT_{sol} qui, quant à lui, vaut une fois et demie environ celui de T_{sol} à 13h ou 1h.

On peut donc conclure que passer des températures instantanées aux écarts thermiques entre 13h et 1h revient à multiplier la dynamique thermique de la scène par un facteur voisin de 2 (9°C au lieu de 4 ou 5 de jour comme de nuit), et cela au prix d'une légère augmentation de la dispersion des valeurs de ΔT dans le cas du sol seulement.

Une conséquence immédiate de cette constatation est de préconiser l'analyse de l'image différentielle, plus contrastée et a priori plus intéressante, en particulier pour discriminer les catégories de surfaces sols et végétations actives. S'agissant de traiter les données à faible résolution spatiale du satellite thermique HCMM, on préférera les données représentant l'écart $\Delta T_{12h - 0h}$ pour retrouver les grandes catégories d'occupation du sol.

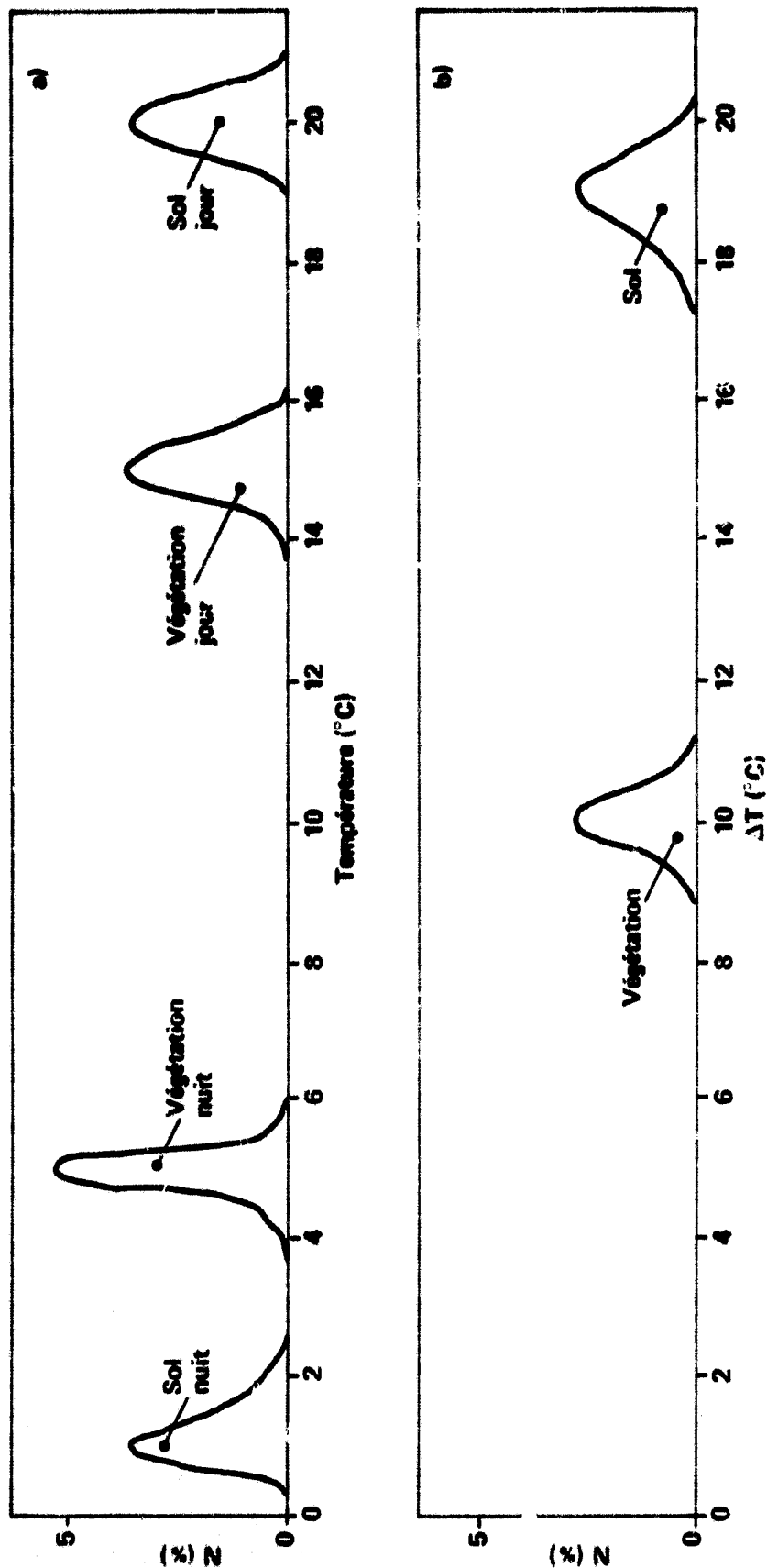


Fig. 10. a) Spectres comparés jour et nuit de deux parcelles contigües de Maïs (no. 1) et de sol nu (no. 65).
b) Spectres de l'écart jour-nuit des températures de la parcelle de Maïs (no. 1) et de sol nu (no. 65).

3/ Rôle de la température nocturne des couverts

Une tendance semble se dégager de l'analyse de la dispersion des températures nocturnes, en particulier de celles des couverts. Les dispersions semblent plus faibles de nuit (Fig.9 et 10) et d'autant plus faibles que les couverts sont plus hauts.

Par le grand nombre de surfaces élémentaires mises en jeu, au moins pour des couverts assez denses et réguliers, l'homogénéité de la température radiative paraît accrue, surtout si les transferts sont faibles (cas de la nuit). De plus, compte tenu des éléments d'analyse présentés au paragraphe précédent (III-2), la température radiative de nuit (pas d'évapotranspiration) se rapprochera d'autant plus de celle de l'air que le couvert sera plus élevé (meilleure compensation due aux protections mutuelles à l'intérieur du couvert, meilleur coefficient d'échange pour les parties supérieures). L'identité entre température de l'air mesurable simplement au-dessus d'un couvert et sa température radiative tend donc à être possible et meilleure avec ce type de couvert. Pour ces raisons, on peut songer à utiliser préférentiellement une végétation haute, couplée avec une mesure de température de l'air juste au-dessus, comme surface de référence thermique - l'émissivité de la végétation étant assez stable - dans l'optique d'un calage des valeurs radiométriques. Ce calage, à partir de mesures simples de terrain, devrait pouvoir plus tard être affiné grâce à la modélisation.

CONCLUSIONS

Les analyses thermiques par scanner dans le domaine de la radiométrie infrarouge (8-14 μm) permettent une bonne détermination des températures de surface. Des critères d'homogénéité peuvent facilement être établis à partir de ces données thermiques, en vue de définir les valeurs les plus

significatives pour l'approche quantitative des bilans d'énergie (évapotranspiration de jour et bilan thermique de nuit).

On a montré qu'une étude fine des parcelles de même nature (cas du Maïs), faite sous l'angle énergétique en fonction de sa résultante : la température de surface, pouvait s'effectuer, mais que pour l'évaporation une température moyenne par classe de surfaces était suffisante. Ainsi, le premier pas indispensable pour l'approche d'une évapotranspiration régionale réside en la détermination de ces valeurs moyennes pour toutes les classes nettement différenciées de la zone étudiée.

Enfin, rappelons l'intérêt d'une analyse différentielle jour-nuit, tant pour accroître les contrastes entre surfaces de type différent que pour définir les comportements énergétiques des surfaces dans leur bilan journalier.

Soulignons finalement que, dans le cas d'une zone homogène, cette étude peut être faite sur une surface relativement réduite, puisque les résultats concernant une zone de $(2,5 \times 2) \text{ km}^2$ ne sont pas sensiblement modifiés lorsqu'on passe à une surface trois fois plus grande.

N°	OCCUPATION du SOL	Moyenne °C		nombre de pixels.		REMARQUES :
		JOUR	NUIT	JOUR	NUIT	
1	MAIS	15,85	3,36			Total image jour = 52832 pixels Nuit = 50956 pixels
2	MAIS	15,55	2,90			
3	MAIS	15,78	3,05			
4	MAIS	15,78	3,61			
5	MAIS	15,78	3,51	14408	14286	
6	MAIS	16,44	2,75			
7	MAIS	16,00	2,80			
8	MAIS	15,70	3,41			
9	MAIS	16,44	3,41			
10	BETTERAVES	15,41	1,48			Total pixel chaumes jour = 30105 Nuit = 28695
11	BETTERAVES	15,78	2,04	1991	1958	
12	BETTERAVES	16,00	1,58			
13	COLZA	17,26	2,09	1426	1291	
14	COLZA	20,07	3,10			
15	BOIS	15,85	3,66	465	453	
16	BOIS	15,70	4,17			
17	CHAUMES ET LABOURS	21,11	0,51	10924	10550	
18	"	21,11	0,61			
19	"	21,99	1,42		4347	
20	"	21,62	1,12	11623	11540	
21	AGGLOMERATION	19,62	3,26			
22	AGGLOMERATION	19,40	4,12	1294	1099	
23	AGGLOMERATION	16,74	3,16			

PHOTO N°	IMAGE N°	NB. DE PIXELS	PARCEL- LE N°	NB. DE PIXELS		TEMPERATURE MOYENNE JOUR		TEMPERATURE MOYENNE NUIT		NB. DE PIXELS DE LA CULTURE POUR CHAQUE IMAGE
				Jour	Nuit	niveau	°C	niveau	°C	
7	1	51059 JOUR 50038 NUIT	1	5025	4201	40	14,96	72	3,66	JOUR
7	1		2	754	849	48	15,55	84	4,27	7833
7	1		3	411	424	52	15,85	77	3,92	
7	1		4	539	781	51	15,78	78	3,97	
7	1		5	366	601	49	15,63	71	3,61	
7	1		6	264	386	50	15,70	68	3,46	
7	1		7	206	159	55	16,07	85	4,33	NUIT
7	1		8	268	178	48	15,55	64	3,26	7579
9	2	52832 JOUR 50956 NUIT	9	876	853	51	15,78	69	3,51	JOUR
9	2		10	265	224	50	15,70	67	3,41	14829
9	2		11	918	1020	54	16,00	74	3,77	
9	2		12	2005	1826	53	15,92	68	3,46	
9	2		13	1138	1190	51	15,78	60	3,05	
9	2		14	1292	1211	51	15,78	71	3,61	
9	2		15	1129	1288	49	15,63	53	2,70	
9	2		16	1094	990	47	15,48	63	3,21	NUIT
9	2		17	1205	166	64	16,74	50	2,54	13851

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY

PHOTO N°	IMAGE N°	NB. DE PIXELS	PARCEL- LE N°	NB. DE PIXELS		TEMPERATURE MOYENNE JOUR		TEMPERATURE MOYENNE NUIT		NB. DE PIXEL DE LA CULTURE POUR CHAQUE IMAGE
				Jour	Nuit	niveau	°C	niveau	°C	
9	2		18	261	228	60	16,44	67	3,41	TOTAL DE MAIS POUR L'IMAGE 2 CF. PAGE PRECEDENTE
9	2		19	128	159	56	16,15	53	2,70	
10	2		20	582	530	54	16,00	55	2,80	
10	2-3		21	4201	4130	49	15,63	65	3,31	
10	2		22	411	508	54	16,00	55	2,80	
10	2		23	177	214	61	16,52	60	3,05	
10	2-3		24	799	879	61	16,52	49	2,49	
12	3		25	313	249	58	16,29	52	2,65	JOUR - 16953
12	3	JOUR 54102	26	941	938	55	16,07	87	4,43	
12	3		27	2329	2120	52	15,85	104	5,29	
12	3		28	1876	1822	49	15,63	83	4,22	
12	3		29	1853	1816	48	15,55	77	3,92	
12	3	NUIT 53292	30	586	758	43	15,18	77	3,92	NUIT 16305
12	3		31	1997	1792	48	15,55	75	3,82	
12	3		32	580	560	56	16,15	70	3,56	
12	3		33	476	440	54	16,00	79	4,02	
12	3		34	148	123	60	16,44	78	3,97	

PHOTO N°	IMAGE N°	NB. DE PIXELS	PARCEL- LE N°	NB. DE PIXELS Jour Nuit	TEMPERATURE MOYENNE JOUR niveau °C	TEMPERATURE MOYENNE NUIT niveau °C	NB. DE PIXEL DE LA CULTE POUR CHAQUE IMAGE
12	3		35	2600 2460	54 16,00	76 3,87	TOTAL
12	3		36	298 333	42 15,11	91 4,63	DE MAIS
12	3		37	298 254	57 16,22	77 3,92	POUR
12	3		38	302 306	58 16,29	70 3,56	L'IMAGE 3
12	3		39	115 115	66 16,89	65 3,31	Cf. PAGE
12	3		40	385 408	54 16,00	84 4,27	PRECEDENTE
12	3		41	204 246	59 16,37	76 3,87	

B E T T E R A V E S

7	1		42	457 434	59 16,37	48 2,44	
9	2		43	1105 976	46 15,41	29 1,48	JOUR 1991
9	2		44	572 671	51 15,78	40 2,04	NUIT 1956
9	2		45	314 309	54 16,00	31 1,58	
12	3		46	312 308	62 16,59	43 2,19	JOUR 689
12	3		47	288 258	66 16,89	35 1,78	NUIT 781
12	3		48	89 215	69 17,11	49 2,49	

PHOTO N°	IMAGE N°	NB. DE PIXELS	PARCEL- LE N°	NB. DE PIXELS		TEMPERATURE MOYENNE JOUR		TEMPERATURE MOYENNE NUIT		NB. DE PIXELS DE LA CULTURE POUR CHAQUE IMAGE
				Jour	Nuit	niveau	°C	niveau	°C	
7	1		49	511	516	46	15,41	67	3,41	JOUR 974
7	1		50	331	250	82	18,07	36	1,83	NUIT 957
7	1		51	132	191	70	17,18	45	2,29	
9	2		52	989	899	71	17,26	41	2,09	JOUR 1422
9	2		53	433	389	109	20,07	61	3,10	NUIT 1288
12	3		54	644	600	63	16,66	29	1,48	JOUR 933
12	3		55	289	285	87	18,44	38	1,93	NUIT 885

L A B O U R S

8	1		65	11634	11406	118	20,73	17	0,87	JOUR 15694
8	1		66	4060	3749	130	21,62	32	1,63	NUIT 15155
10	2		64	558	444	122	21,03	12	0,61	J : 558 N : 444

L A B O U R S A P P L A N I S

8	1		63	729	756	132	21,77	52	2,65	J : 729 N : 756
10	2		62	3662	3544	130	21,62	14	0,71	JOUR 4659
10	2		61	997	1056	144	22,66	16	0,81	NUIT 4600

C H A U M E S A P P L A N I S

10	2		67	307	420	95	19,03	36	1,83	J : 307 N : 420
----	---	--	----	-----	-----	----	-------	----	------	--------------------

CHAUMES TRAVAILLES

[illegible]